

УДК 62-52

**С.Я. ГАЛИЦКОВ**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механизации, автоматизации и энергоснабжения строительства Самарский государственный архитектурно-строительный университет

**А.С. ФАДЕЕВ**

кандидат технических наук, доцент кафедры механизации, автоматизации и энергоснабжения строительства Самарский государственный архитектурно-строительный университет

## ОЦЕНКА СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ НА ПРОИЗВОДСТВО КЕРАМЗИТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АЛГОРИТМА СОГЛАСОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЕЧЬЮ

ASSESSMENT OF DECREASE IN ENERGY CONSUMPTION ON PRODUCTION EXPANDED CLAY WHEN USING ALGORITHM OF THE COORDINATED MANAGEMENT BY THE FURNACE

*Представлены результаты анализа эффективности применения согласованного автоматического управления режимами работы горелки и привода загрузки вращающейся печи при обжиге керамзита. На примере печи типоразмера 2,5 × 40 м, в которой обжигается сырец из глины смышляевского месторождения, показана возможность снижения энергозатрат на производство 1 м<sup>3</sup> керамзита на 11-15 %.*

**Ключевые слова:** керамзит, вращающаяся печь, снижение энергозатрат, согласованное управление, объемная тепловая мощность, загрузка печи.

**1. Введение.** Современное строительство предъявляет целый ряд новых требований к производству керамзита<sup>1</sup>. Среди них можно выделить два основных. Во-первых, в связи с все более расширяющимися областями технологического применения керамзита необходим выпуск его с широким диапазоном величины насыпной плотности  $\rho = 150, \dots, 800 \text{ кг/м}^3$ . При этом ставится задача уменьшения погрешности отклонения  $\rho$  от заданного значения с целью повышения однородности характеристик керамзита.

Второе основное требование – снижение энергозатрат на производство керамзита<sup>2</sup>, что существенно повышает его конкурентоспособность по сравнению с другими наполнителями.

*Presents the results of the analysis of efficiency of application of the harmonized automatic control modes of operation of the burner and the drive boot the rotary kiln for firing of expanded clay. On the example of the furnace size of 2.5 × 40 m, in which fired raw clay smushlaevsk's Deposit, the possibility to reduce energy consumption for production of 1 m<sup>3</sup> of expanded clay 11-to 15 %.*

**Keywords:** expanded clay, rotary kiln, the reduction of energy and coordinated management, volumetric heat capacity, loading of the furnace.

Для достижения поставленной цели необходимо решение как технологических задач<sup>3</sup>, связанных главным образом с приготовлением гранул сырца, так и совершенствование систем управления технологическим оборудованием производства керамзита, прежде всего – печью обжига [1]. В настоящей статье дается оценка снижения энергозатрат производства керамзита во вращающейся печи при использовании алгоритма согласованного управления режимом работы горелки и загрузки сырца.

**2. Постановка задачи.** Допускаем, что сырец, загружаемый во вращающуюся печь, отвечает технологическим требованиям, предъявляемым к производству керамзита. В этих условиях качество керамзита в значительной мере определяется параметрами теплового поля печи, что характеризуется кривой обжига [2], в линейно-кусочной аппроксимации кото-

<sup>1</sup> Комиссаренко Б.С. Перспективы развития производства керамзита и керамзитобетона с учетом современных задач стройиндустрии // Строительные материалы. 2000. №6. С. 22-23.

<sup>2</sup> Литвиненко А. Рациональный выбор естественных, искусственных заполнителей бетонной смеси // Строительная газета. 2003. 11 марта.

<sup>3</sup> Анализ причин низкого качества традиционного керамзита и разработка технологических принципов производства особо легкого керамзита шарообразной формы (II) / М.Г. Габидуллин, Р.З. Рахимов, Р.М. Гильфанов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2005. №9, ч. I. С. 62-64.

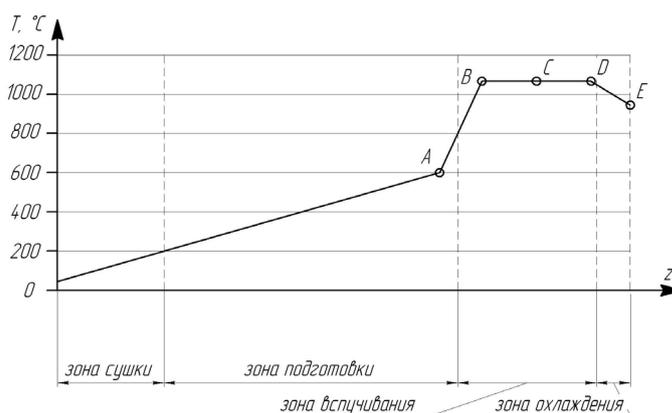


Рис. 1. Кривая обжига керамзита во вращающейся печи

рой<sup>4</sup> (рис. 1) процесс вспучивания представлен участком ABCDE, где принято подтвержденное практикой допущение, что отрезок BD параллелен оси z.

Исследования области управляемости процесса вспучивания керамзита как объекта управления в пространстве параметров<sup>5</sup> (объемная тепловая мощность горелки  $Q_{\text{п}}$  и загрузка печи  $q_3$ ) показали, что координаты  $z_A$  и  $z_C$  точек A и C ломаной ABCDE практически не меняют своих значений во всем технологически возможном диапазоне изменения указанных параметров, а отрезок BD перемещается вдоль оси OT и меняет свою длину при вариации величины  $Q_{\text{п}}$  горелки.

Известны результаты экспериментальных исследований влияния температуры  $T_A$  на величину  $\rho$  [2]. Они представлены множеством N нелинейных зависимостей

$$K_{\text{всп},i} = F_1(T_A, \gamma_i), \quad (1)$$

где  $K_{\text{всп}}$  – коэффициент вспучивания;  $K_{\text{всп}} = \rho_c / \rho$ , здесь  $\rho_c$  – насыпная плотность сырца;  $\gamma_i$  – обобщенный показатель свойств глины i-го месторождения,  $i \in 1, 2, \dots, n$ , здесь n – число исследованных месторождений глины.

Зависимости (1) получены в условиях осуществления обжига на верхней границе технологически допустимого диапазона температуры керамзита в

точке C:  $T_C = T_{\text{Сmax}}$ . Исследования, выполненные в [3], позволили найти множество R зависимостей

$$\rho = F_2(T_A, T_C, \gamma_i), \quad (2)$$

с помощью которого расширяются технологические возможности получения керамзита с требуемым значением  $\rho$  за счет управления величиной  $T_C$  путем изменения  $Q_{\text{п}}$  горелки.

Как показано в [3], для рассматриваемого типоразмера печи температура  $T_A$  нелинейно зависит как от расхода  $q_3$  загружаемого сырца, так и от его влажности w:

$$T_A = F_3(q_3, w, \gamma_i). \quad (3)$$

Таким образом, при решении производственной задачи по выпуску керамзита с требуемым значением  $\rho$  на основании зависимостей (2) и (3) можно решить задачу определения оптимального соотношения между значениями  $Q_{\text{п}}$  и  $q_3$ .

Требуется на математической модели печи [4], оснащенной системой автоматического согласованного управления  $Q_{\text{п}}$  и  $q_3$  [1], найти величину энергозатрат на выпуск 1 м<sup>3</sup> керамзита заданной величины  $\rho$  и сравнить эти затраты с затратами при использовании в настоящее время эвристическом управлении обжигальщиком тепловой мощностью  $Q_{\text{п}}$  горелки в условиях постоянной величины загрузки  $q_3(t) = \text{const}$ .

**3. Решение задачи.** Для оценки эффективности применения метода согласованного управления проведем ряд вычислительных экспериментов с использованием модели [4] в условиях выбора рациональных значений параметров задатчиков системы управления [1].

Моделирование осуществлялось для печи типоразмера 2,5×40 м, оснащенной газовой горелкой. В печь поступает сформованный сырец с постоянным гранулометрическим составом, изготовленный из глины смышляевского месторождения. Для этой

<sup>4</sup> Галицков С.Я. Взаимовлияние режима работы горелки и загрузки печи на насыпную плотность керамзита // Интерстроймех-2012: материалы Международной научно-технической конференции, 2-4 октября 2012 г., Россия. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2012. С. 200-205.

<sup>5</sup> Галицков С.Я. Области управляемости вспучивания керамзита [Текст] / С.Я. Галицков, А.С. Фадеев // Интерстроймех-2011: материалы Международной научно-технической конференции / М-во образования и науки Рос. Федерации, Междунар. ассоциация автомоб. и дорожного образования, УМО вузов Рос. Федерации по образам. в обл. трансп. машин и трансп.-технол. комплексов, Могилевавтодор, Дорожно-строительный трест №12, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2011. С. 273-275.

глины в соответствии с (2) и (3) определены значения  $Q_{\text{п}}$  и  $q_3$ , необходимые для оптимального проведения процесса вспучивания керамзита.

На первом этапе решения задачи оценим энергозатраты на производство керамзита, когда используется широко распространенное на предприятиях ручное «эвристическое» управление вспучиванием обжигальщиком путем изменения мощности  $Q_{\text{п}}$  горелки при постоянной величине загрузки печи. Моделирование выполнялось для режима, когда постоянная загрузка  $q_3 = 4,5$  т/ч, влажность материала  $w = 15\%$ . Исследования выполнялись для шести значений  $Q_{\text{п}} = 28000; 30000; 32000; 34000; 36000; 38000$  Вт/м<sup>3</sup>. По результатам моделирования определены для каждого опыта значения  $T_A$  и  $T_C$ , вычислено значение коэффициента вспучивания  $K_{\text{всп}}$ , найдена плотность керамзита  $\rho = \rho_0/K_{\text{всп}}$ . Исходя из известной зависимости [5]

$$Q_{\text{г}} = F_4(Q_{\text{п}}), \quad (4)$$

определен расход газа  $Q_{\text{г}}$  (и эквивалентный ему расход условного топлива  $Q_{\text{у}}$ ), подаваемого в горелку для создания объемной тепловой мощности  $Q_{\text{п}}$ . Производительность печи определяется выражением  $\Pi = (q_3 K_{\text{всп}})/\rho_c$ . Затраты газа для вспучивания 1 м<sup>3</sup> керамзита определяются отношением  $\sigma_{0\text{г}} = Q_{\text{г}}/\Pi$ , затраты условного топлива  $\sigma_{0\text{у}} = Q_{\text{у}}/\Pi$ . Результаты вычислительных экспериментов сведены в табл. 1.

На втором этапе выполнена оценка энергозатрат на производство керамзита при согласованном управлении режимом работы горелки и загрузки печи. Для этого необходимо решить систему нелинейных уравнений в условиях, когда известно значение  $\gamma_i$  и задан типоразмер печи:

$$\begin{cases} \rho = F_2(T_A, F_C, \gamma_i), \\ T_A = F_3(q_3, w, \gamma_i), \\ Q_{\text{г}} = F_4(Q_{\text{п}}). \end{cases} \quad (5)$$

При решении задачи численным методом задаемся требуемой плотностью керамзита  $\rho$  и получаем требуемые значения температур керамзита в точках А и С ( $T_A$  и  $T_C$ ).

Результаты сведены в табл. 2. Затем на вычислительной модели [4] решается обратная задача, целью которой является определение таких значений  $Q_{\text{п}}$  и  $q_3$ , при которых на выходе модели формируются необходимые  $T_A$  и  $T_C$ .

Дальнейшая обработка результатов вычислительных экспериментов осуществляется аналогично первому этапу.

По результатам, приведенным в табл. 1 и 2, построены графические зависимости  $\sigma_{0\text{г}}$  и  $\sigma_{1\text{г}}$  от насыпной плотности  $\rho$  керамзита (рис. 2).

Таблица 1

Зависимость энергозатрат на производство керамзита  $\sigma_0$  от коэффициента вспучивания  $K_{\text{всп}}$  при  $q_3(t) = \text{const} = 4,5$  т/ч

$q_3$ , т/ч	$Q_{\text{п}}$ , Вт/м <sup>3</sup>	$T_A$ , °С	$T_C$ , °С	$K_{\text{всп}}$	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$Q_{\text{г}}$ , м <sup>3</sup> /с	$\Pi$ , м <sup>3</sup> /ч	$\sigma_{0\text{г}}$	$\sigma_{0\text{у}}$
4.5	28000	586	935	1.502	692	0.1005	6.50	55.68	64,01
4.5	30000	586	977	2.376	438	0.1182	10.28	41.40	47,60
4.5	32000	586	1003	3.041	342	0.1359	13.16	37.17	42,75
4.5	34000	586	1028	3.773	276	0.1535	16.33	33.85	38,92
4.5	36000	586	1075	5.265	198	0.1712	22.78	27.05	31,11
4.5	38000	586	1140	6.616	157	0.1888	28.63	23.74	27,30

Таблица 2

Зависимость энергозатрат на производство керамзита  $\sigma_1$  от коэффициента вспучивания  $K_{\text{всп}}$  при согласованном управлении  $Q_{\text{п}}$  и  $q_3$ 

$K_{\text{всп}}$	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$T_A$ , °С	$T_C$ , °С	$Q_{\text{п}}$ , Вт/м <sup>3</sup>	$q_3$ , т/ч	$Q_{\text{г}}$ , м <sup>3</sup> /с	$\Pi$ , м <sup>3</sup> /ч	$\sigma_{1\text{г}}$	$\sigma_{1\text{у}}$
1.096	949	742	920	26300	13.9	0.0855	14.65	21.03	24,16
1.113	935	677	920	26800	9.5	0.0900	10.16	31.86	36,67
1.181	880	612	920	27100	5.8	0.0926	6.59	50.60	58,17
1.277	815	600	924.5	27350	5.1	0.0948	6.26	54.51	62,70
1.918	542	600	950	28600	5.2	0.1058	9.59	39.73	45,67
2.548	408	600	989	30500	5.2	0.1226	12.74	34.64	39,84
3.092	336	600	1010	32500	5.2	0.1403	15.46	32.66	37,57
4.075	255	592	1040	34500	5	0.1579	19.59	29.02	33,37
4.925	211	599	1070	35800	5.1	0.1694	24.15	25.25	29,04
5.702	182	604	1100	36800	5.4	0.1782	29.61	21.67	24,92
6.138	169	606	1130	37800	5.5	0.1871	32.46	20.75	23,86

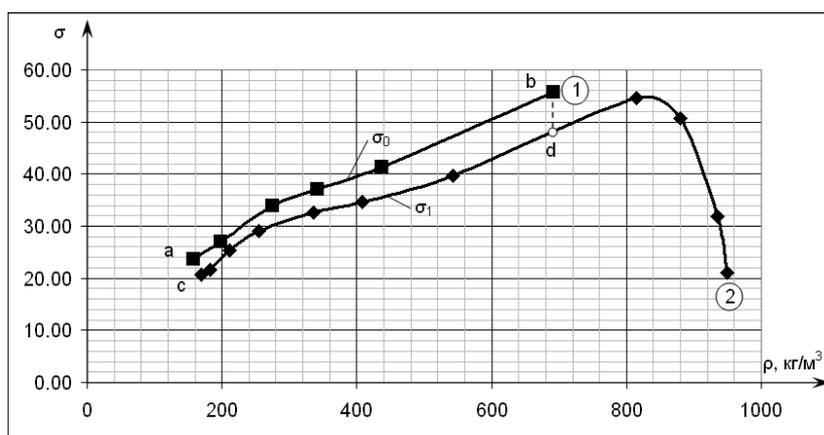


Рис. 2. Энергозатраты на производство керамзита в функции плотности

Таблица 3

Оценка снижения энергозатрат от использования согласованного управления  $Q_n$  и  $q_s$  при производстве керамзита с требуемым значением плотности  $\rho$

$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\sigma_0$	$\sigma_1$	$\delta$ , %
692	55.68	48	13.8
438	41.40	35.5	14.2
342	37.17	33	11.2
276	33.85	30	11.4
198	27.05	23.8	12.0
157	23.74	20	15.8

Оценим снижение энергозатрат на производство керамзита путем сравнения графиков 1 и 2 (рис. 2) на отрезках ab и cd соответственно. Результаты сравнения сведены в табл. 3. Снижение энергозатрат оценивалось по формуле  $\delta = \frac{\sigma_0 - \sigma_1}{\sigma_0} \cdot 100\%$ .

**4. Заключение.** Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

а) Применение согласованного управления расширяет технологические возможности печи обжига, а именно, при прочих равных условиях в этом случае можно обеспечить производство керамзита с диапазоном плотностей 170-950 кг/м<sup>3</sup>, в то время как при традиционном ручном управлении он составляет 160-700 кг/м<sup>3</sup>.

б) Зависимость энергозатрат от плотности выпускаемого керамзита (рис. 2) имеет экстремум. Для выполненных экспериментов он соответствует значению 800-850 кг/м<sup>3</sup>.

в) Показано, что применительно к печи типоразмера 2,5×40 м и в условиях использования смышляевской глины применение согласованного управления позволяет снизить энергозатраты на обжиг керамзита на 11-15 %.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Галицков, С.Я. Структурный синтез системы управления вспучиванием керамзита во вращающейся печи [Текст] / С.Я. Галицков, А.С. Фадеев // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 1; URL: www.science-education.ru/101-5627.
2. Онацкий, С.П. Производство керамзита. – 3-е изд., перераб. и доп. [Текст] / С.П. Онацкий. – М.: Стройиздат, 1987. – 333 с., ил.
3. Галицков, С.Я. Экспериментальные исследования влияния геометрии факела на прочность керамзита [Текст] / С.Я. Галицков, А.С. Пышкин, А.С. Фадеев // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре: материалы 68-й Всероссийской научно-технической конференции по итогам НИР 2010 г. / СГАСУ. – Самара, 2011. – С. 726-729.
4. Фадеев, А.С. Моделирование вспучивания керамзита во вращающейся печи как объекта управления. [Текст] / А.С. Фадеев, С.Я. Галицков, А.И. Данилушкин // Вестник Самарского государственного технического университета, Серия «Технические науки». – №2 (30) СамГТУ. – Самара, 2011. – С. 160-168.
5. Перегудов, В.В. Тепловые процессы и установки в технологии строительных изделий и деталей: учебник для ВУЗов [Текст] / В.В. Перегудов, М.И. Роговой. – М.: Стройиздат, 1983. – 416 с.

© Галицков С.Я., Фадеев А.С., 2013